

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
Fakulta strojní                      Katedra materiálu



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**



**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**FAKULTA STROJNÍ**  
**KATEDRA MATERIÁLU**

**DIAGNOSTIKA POREZITY LEHKÝCH SLITIN VÍŘIVÝMI  
PROUDY NA OBROBENÝCH PLOCHÁCH**

**DIAGNOSTICS POROSITY LIGHT ALLOYS EDDY  
CURRENTS ON MACHINED SURFACES**

**KMT – B – 183**

Autor: Ondřej Kovács  
Vedoucí BP: doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.

Rozsah práce

Počet stran : 42

Počet obrázků : 18

Počet tabulek : 10

Počet grafů : 5

V Liberci, květen 2011



## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

Jméno a příjmení	<b>Ondřej K O V Á C S</b>
Studijní program	<b>B2341 Strojírenství</b>
Obor	<b>Materiály a technologie</b>
Zaměření	<b>Materiálové inženýrství</b>

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářská práce na téma:

### **Diagnostika porezity lehkých slitin vířivými proudy na obrobených plochách**

#### **Zásady pro vypracování:**

(uveďte hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Seznamte se s výsledky předchozích studentských prací [1], mezní porezitou v odlitcích.
2. Prostudujte metodiku měření elektrické vodivosti, vad metodou vířivých proudů. Opatřete vhodné vzorky s řízenou porezitou a z reálných odlitků.
3. Proveďte experimentální měření přístroji NORTEC1000 a SIGMATEST a mikroskopickou kvantifikaci porezity.
4. Definujte podmínky pro praktickou aplikaci výsledků práce, směr dalšího vývoje.

Forma zpracování bakalářské práce:

- průvodní zpráva v rozsahu 25 – 40 stran
- přílohy

Seznam literatury (uved'te doporučenou odbornou literaturu):

- [1] Švec, M.: *Výzkum porózy kovových soustav v práškové metalurgii metodami nedestruktivního testování*. KMT – B141, bakalářská práce, TU v Liberci 2009.
- [2] Kopec, B. a kol.: *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. Akademické nakladatelství CERM, Brno, 2008, ISBN-978-80-7204-591-4.
- [3] ASM Handbook.: *Nonferrous Alloys*. Volume 2, PDF version, 1.4. 2004.
- [4] Němec M., Provazník J.: *Slévárenské slitiny neželezných kovů*. ČVUT, Praha, 2008, ISBN-978-80-01-04116-1.
- [5] Roučka, J.: *Metalurgie neželezných kovů*. Akademické nakladatelství CERM, Brno, 2004, ISBN 80-214-2790-6.

Vedoucí bakalářské práce:  
Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc., KMT FS TUL  
Aleš Čermák, VŘJ, KSM Castings a. s.

L.S.

prof. Ing. Petr LOUDA, CSc.  
vedoucí katedry

doc. Ing. Miroslav MALÝ, CSc.  
děkan

V Liberci dne 21. 3. 2011

## **ANOTACE**

Bakalářská práce se zabývá zkoumáním porezity vzorků ze slévárenské slitiny typu Al-Si, tzv. siluminů, prostřednictvím nedestruktivní metody zkoušení. Práce vyhodnocuje míru porezity s použitím nedestruktivní metody vířivých proudů a mikroskopickou kvantifikaci porezity.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** vodivost, porezita, nedestruktivní zkoušení (vířivé proudy)

## **ANNOTATION**

This bachelor work examines porosity of samples from casting alloys like Al-Si, the so called silumin, through non-destructive testing method. The work evaluates the degree of porosity a non-destructive method using eddy currents and microscopic quantification of porosity.

**KEY WORDS:** conductivity, porosity, non-destructive testing (eddy currents)

## **Poděkování**

V úvodu bych rád poděkoval za podporu, rady a odborný dohled vedoucímu své bakalářské práce doc. Ing. Břetislavu Skrbkovi, CSc. a Ing. Pavlu Hanusovi, PhD. za pomoc při elektronickém sčítání porezity pomocí programu NIS- Elements 2.30.

Nemalé poděkování patří také panu Davidu Holdovi z firmy FOERSTER TECOM s.r.o., který mi umožnil měření vodivosti vzorků pomocí vířivoproudého přístroje SIGMATEST 2.069.

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

V Liberci dne 27. 5. 2011

Podpis

# Obsah

1. Úvod	9
2. Neželezné kovy a jejich slitiny	10
2.1. Rozdělení a označování	10
2.2. Hliník	11
2.3. Slitiny hliníku	12
2.3.1. Slitiny hliníku pro tváření	13
2.3.2. Slévárenské slitiny hliníku	13
2.3.2.1. Slitiny typu Al-Si	14
2.3.2.2. Modifikace slitin Al-Si	16
2.4. Vady odlitků	17
2.4.1. Plyny ve slitinách hliníku	17
2.4.2. Rozpustnost vodíku ve slitinách hliníku	17
2.4.3. Vznik plynových dutin v odlitcích	18
2.4.4. Vliv porezity na vlastnosti odlitků	20
3. Nedestruktivní zkoušení	20
3.1. Metoda vířivých proudů	20
3.1.1. Povrchový jev	21
3.1.2. Uspořádání cívek	23
4. Hodnocení míry porezity	25
4.1. Příprava vzorků ze slitiny AlSi11	25
4.2. Zjišťování vad materiálu přístrojem SIGMATEST 2.069	26
4.2.1. Zjišťování míry porezity vzorků prostřednictvím úbytku vodivosti	27
4.3. Hodnocení porezity vzorků pomocí programu NIS-Elements 2.30	28
5. Popis mikroskopických struktur vybraných vzorků	30
6. Diskuze	33
7. Závěr	41
8. Použitá literatura	42





## 1. Úvod

Předmětem této bakalářské práce je hodnocení míry porezity na osmi vzorcích z normalizované hliníkové slitiny Al-Si, tzv. siluminů. Vzorky, resp. odlitky, byly odlity na katedře slévárenství Technické univerzity v polském městě Čenstochová.

V současné době je světová produkce a spotřeba primárního hliníku kolem 22-24 milionů tun ročně a nutno připočítat cca 8-10 milionů tun recyklovaného hliníku a jeho slitin. A v dnešní době jeho výroba stále prudce stoupá, především v Číně.

Výrobky z hliníku a jeho slitin v dnešní době stále častěji nalézají širokou škálu uplatnění, a proto pro jeho masivní výrobu je nezbytně nutné věnovat pozornost především rafinaci – tj. odstranění všech nebo většiny nežádoucích plynných a tuhých směsí, které nejsou předeepsaného složení slitiny. Takovéto slitiny jsou jinak poté určitým způsobem nevhodné nebo znehodnocené, což má vliv na mechanické vlastnosti slitin a může vést i k následné destrukci namáhaných dílů.

Jedním z jevů vznikající po odlití při tuhnutí kovu jako slévárenská vada je porezita, kterou se tato práce zabývá a hodnotí míru samotné porezity ze získaných vzorků prostřednictvím nedestruktivní metody vířivých proudů a také mikroskopickou kvantifikací pórovitosti materiálu.



## 2. Neželezné kovy a jejich slitiny

Pod pojmem neželezné kovy se v technické praxi obvykle rozumí všechny kovy a slitiny, u nichž je základním prvkem jiný kov, než železo. Ačkoliv světová výroba a spotřeba neželezných kovových materiálů je ve srovnání se slitinami železa řádově menší, jsou tyto materiály pro určitá použití nenahraditelné. Význam jednotlivých kovů nelze hodnotit jenom objemem jejich výroby nebo cenou, ale také specifickými vlastnostmi, kterými disponují a které často nelze jinými prostředky dosáhnout. Důvodem pro použití neželezných kovů, resp. jejich slitin, jsou jejich specifické vlastnosti, mezi které patří požadavky na vysokou elektrickou a tepelnou vodivost, nízkou měrnou hmotnost, dobré kluzné vlastnosti výrobku, často ve spojení především s dobrými pevnostními a plastickými charakteristikami při nízkých nebo naopak vysokých teplotách.

Pro aplikace ve strojírenství (součásti elektrických obvodů, kontakty, pružiny, korozně a tepelně namáhané součásti apod.) se používají čisté kovy jen velmi zřídka, neboť mívají špatné mechanické i technologické vlastnosti. Téměř vždy se jedná o slitiny z dvou nebo více prvků. Slitiny mají lepší mechanické a technologické vlastnosti než čisté kovy a vhodnou kombinací prvků lze získat slitiny s velmi rozdílnými vlastnostmi. Některé z nich mají naprosto jedinečné vlastnosti a objem jejich výroby je proto jen velmi malý. [4, 5]

### 2.1. Rozdělení a označování

Kriteria pro rozdělení neželezných kovů a jejich slitin jsou teplota tavení, měrná hmotnost a chemická stálost. Podle těchto hledisek se rozlišují:

- **lehké kovy** (Al, Mg, Ti) – měrná hmotnost do  $5000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- **kovy s nízkou teplotou tavení** (do  $500^\circ\text{C}$ ), např. Pb, Sn, Zn
- **kovy se střední teplotou tavení** ( $1000$  až  $1500^\circ\text{C}$ ), např. Cu, Co, Ni
- **kovy s vysokou teplotou tavení** ( $1800$  až  $3400^\circ\text{C}$ ), např. Cr, Mo, Nb, Ta, V, W
- **ušlechtilé kovy**, např. Ag, Au, Pt. [6]

Číselné označování neželezných kovů a slitin, včetně označení jejich stavu a jakosti (po určitém zpracování) je podle ČSN znázorněno v *tab. 1*. Z tohoto značení obvykle nevyplývá chemické složení slitiny.



42	X X	X	X	. X	X
Hutní skupina	Typ slitiny a legujících prvků 30 – 33 Cu 40 – 43 Al	Pořadové číslo slitiny Liché – slévárenské Sudé – tvářené		Stav	Další jakost

Tab. 1 - Značení neželezných kovů a slitin podle ČSN [4]

Značení chemickými značkami uvádí střední obsah hlavních prvků v procentech. Na první pozici je značka základního prvku, na dalších místech značky přísadových prvků v pořadí jejich obsahu. Číslice za značkou prvku značí jeho střední obsah ve slitině. Při obsahu prvku nižším než 1 % se obvykle množství prvku neuvádí.

*Například:*

- CuAl9Mn2 označuje hliníkový bronz s obsahem 9% hliníku a 2% manganu
- AlSi10Mg je silumin s 10% křemíku a méně než 1% hořčíku

Označování podle ČSN je postupně nahrazováno alfanumerickým označováním podle ČSN EN. Jedná se o českou verzi evropské normy EN. Příklad číselného označení slitiny **EN AC-43300** je v tab. 2. [4, 5, 8]

EN	A	C	4	3300
Evropská norma	Materiálová skupina - hliník	Odlitky	Hlavní slitinový prvek (2-Cu, 4-Si, 5-Mg)	Předmět, konkrétní slitina

Tab. 2 - Příklad značení podle ČSN EN 1706 [4]

## 2.2. Hliník

Technicky čistý hliník je nejrozšířenější kov v zemské kůře a spotřebou druhý nejvýznamnější po železe. Teplota tavení hliníku je 660°C, dále se vyznačuje nízkou měrnou hmotností ( $2700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ), velmi dobrou elektrickou ( $34 \text{ až } 38 \text{ MS} \cdot \text{m}^{-1}$ ) a tepelnou konduktivitou ( $210 \text{ až } 230 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ). Je to nealotropický kov s kubickou plošně středěnou krystalovou mřížkou. V důsledku toho má hliník i jeho slitiny velmi dobrou tvařitelnost za tepla i za studena, ale svařitelnost je podmíněná, obrobitelnost je dobrá a slévateľnost obtížná.



Výchozí surovinou pro výrobu hliníku je hutnický vyrobený oxid hlinitý, který se získává z minerálu zvaného bauxit a tvoří základní surovinu pro výrobu hliníku. Výrobním postupem je elektrolytická výroba. Hliník se na vzduchu pokrývá tenkou vrstvičkou  $Al_2O_3$ . Tato vrstvička ochranné oxidické vrstvy na povrchu součástí má za normální teploty tloušťku asi  $0,1 \mu m$  a brání hloubkové oxidaci a zajišťuje velmi dobrou odolnost proti korozi. Ovšem neodolává hydroxidům ( $NaOH, KOH$ ) a halovým kyselinám ( $HCl, HF$ ). Čím je hliník čistší, tím lépe odolává korozi.

Mechanické vlastnosti čistého hliníku jsou špatné. Pevnost v tahu je do  $100 MPa$ , ovšem můžeme ji zvýšit tvářením za studena – *deformační zpevnění*. Tvrdost je  $20 - 30 HB$ , tažnost nad  $20 \%$ . Jako konstrukční materiál je čistý hliník prakticky nepoužitelný, proto mechanické vlastnosti zvyšujeme legováním.

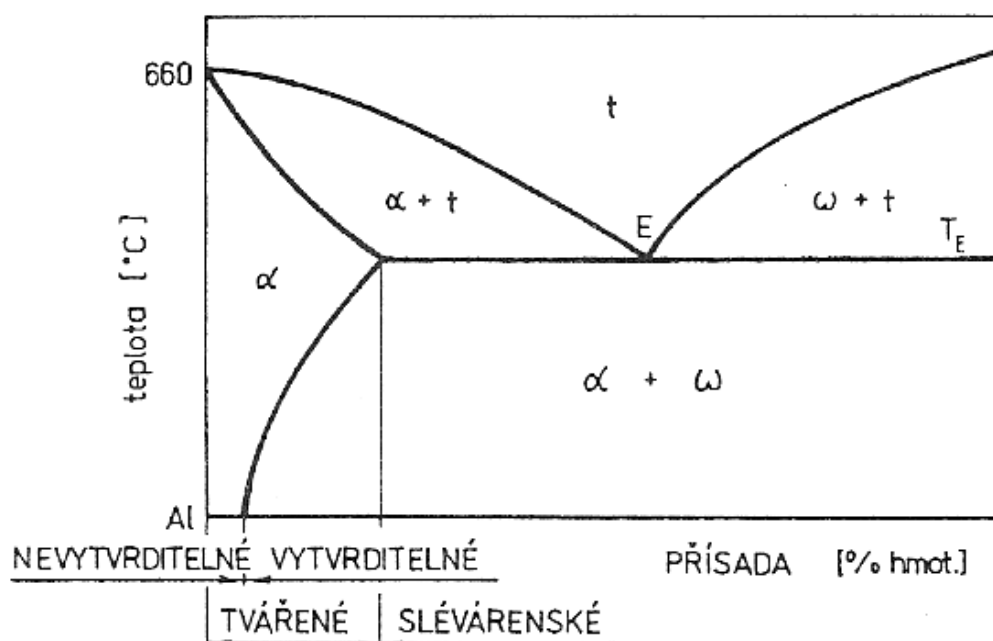
Hliník se především používá v elektrochemickém průmyslu (díky velmi dobré elektrické vodivosti) jako např. vodiče nebo kondenzátory. Dále pak v chemickém a potravinářském průmyslu. A v neposlední řadě na výrobu slitin hliníku, které zlepšují mechanické a technologické vlastnosti. [4, 5, 6]

## 2.3. Slitiny hliníku

Hliník tvoří s většinou přísadových kovů tuhý roztok a největší rozpustnost je v tuhém stavu při eutektické teplotě. S klesající teplotou rozpustnost přísad klesá a při teplotě okolí bývá malá, nebo i zanedbatelná. Slitiny obsahují základní prvek, hlavní přísadový prvek, vedlejší přísadový prvek a doprovodné prvky. [5]

Slitiny hliníku můžeme rozdělit na základě rovnovážného diagramu dané soustavy. Pro jednoduchost zde uvažujeme pouze binární soustavu (*obr. 1*), avšak v technické praxi se většinou používají vícesložkové slitiny. [6]

Nejčastější je dělení slitin podle způsobu zpracování. Podle ČSN je registrováno 18 slitin hliníku pro tvářením a 16 slitin hliníku pro odlitky. Jiným kritériem pro dělení slitin může být jejich schopnost zvýšit tvrdost a pevnost tepelným zpracováním – vytvrzováním. Tato schopnost souvisí s chemickým složením slitin, jak je patrné podle schematicky vyjádřeného binárního diagramu. Homogenní slitiny nebo slitiny, které lze ohřevem homogenizovat (do oblasti  $\alpha$ ) jsou vhodné k tvářením a ty, které při teplotě okolí obsahují segregát jsou vytvrditelné. Slitiny obsahující ve struktuře eutektikum jsou vhodné pro slévání. [6]



Obr. 1 – Schéma obecného rovnovážného diagramu binárních slitin [8]

### 2.3.1. Slitiny hliníku pro tváření

Slitiny soustav **Al-Mg** a **Al-Mn** se řadí mezi slitiny *nízkopevnostní s dobrou odolností proti korozi*. Dobrá odolnost proti korozi i bez povrchové ochrany je zajištěna díky absenci mědi. Tyto slitiny nelze ovšem tepelně zpracovávat za účelem zpevnění (vytvrzení). Jejich pevnost lze zvyšovat deformačním zpevněním při tváření za studena. Zařazují se sem také slitiny **Al-Mg-Si**, které lze tepelným zpracováním vytvrdit ( $R_m = 350 \text{ MPa}$ ). Používají se zejména v leteckém a ve stavebním průmyslu. [8]

Mezi slitiny s *vyšší a vysokou pevností, avšak nízkou odolností proti korozi* zařazujeme nejvíce používané slitiny **Al-Cu-Mg**. Jsou to zejména duraly **AlCu4Mg**, **AlCu4Mg1** a **AlCu4Mg1Mn**, které dosahují značné pevnosti po vytvrzení tepelným zpracováním ( $R_m = 530 \text{ MPa}$ ). Mezi další vytvrditelné slitiny hliníku patří například slitiny typu **Al-Cu-Si-Mn**, **Al-Zn-Mg**, **Al-Zn-Mg-Cu**. [8]

### 2.3.2. Slévárenské slitiny hliníku

Od roku 1995 je v ČSN registrováno 16 slitin hliníku na odlitky. Slévárenské slitiny jsou určeny k výrobě tvarových odlitků a jejich příznivé technologické vlastnosti umožňují odlévání do pískových forem, do kokil nebo tlakové lití. Jsou charakterizovány vyšším obsahem přísad, určitým podílem eutektika ve struktuře a horšími mechanickými vlastnostmi



(maximální pevnost bývá do 250 MPa). Tyto mechanické vlastnosti především závisí na způsobu odlévání. Hrubá struktura s nejnižšími pevnostními charakteristikami vzniká při lití do písku, jemná struktura s lepšími vlastnostmi se tvoří při lití do kovových forem nebo při tlakovém lití. [6, 8]

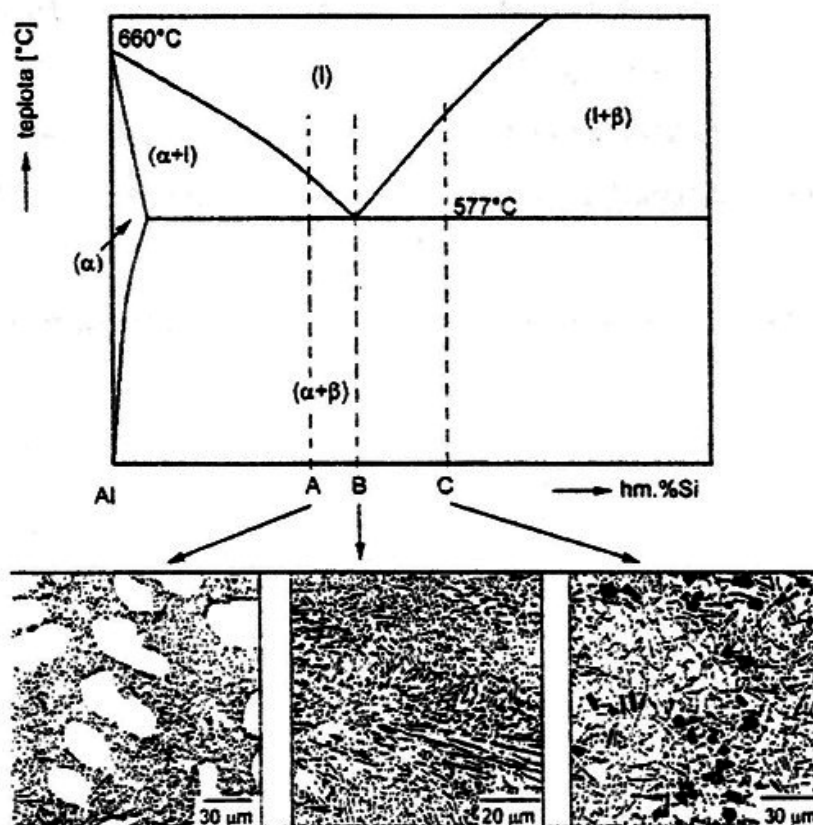
### 2.3.2.1. Slitiny typu Al-Si

Slitiny tohoto pod názvem siluminy patří k nejrozšířenějším skupinám slitin hliníku a obsahují 4,5 až 24% Si + další přísady (Mn, Cu). Tyto slitiny obecně dobře vyplňují dutinu formy, málo se smršťují, mají velmi dobrou zabíhavost a malou náchylnost ke tvorbě trhlin za tepla. Přísadou Mn můžeme eliminovat nepříznivý vliv Fe na tažnost, houževnatost a slévarenské vlastnosti siluminů. Pro zvýšení meze únavy, ovšem při snížené odolnosti proti korozi, můžeme jako přísadu použít Cu. [6]

Hliník s křemíkem tvoří rovnovážný diagram s omezenou vzájemnou rozpustností složek v tuhém stavu. Na *obr. 2* je znázorněna část rovnovážného stavového diagramu Al-Si a na něm jako příklad tři slitiny, jejich místo v diagramu a tomu odpovídající mikrostruktury: [4]

- A.....slitina Al-Si podeutektická (pod 11,7% Si)
  - je složena z primární dendritických krystalů  $\alpha(\text{Al})$  a eutektika  $\alpha(\text{Al})+\text{Si}$
- B.....slitina Al-Si eutektická (kolem 11,7% Si)
  - je složena pouze z eutektika  $\alpha(\text{Al})+\text{Si}$
- C.....slitina Al-Si nadeutektická (od 11,7 do 24% Si)
  - obsahuje primární polyedrické krystaly Si a eutektikum  $\alpha(\text{Al})+\text{Si}$  [4]

Nejlepší slévarenské vlastnosti mají eutektické siluminy. Eutektikum v binárních siluminech je složeno ze směsi tuhého roztoku  $\alpha$  a krystalů téměř čistého křemíku (fáze  $\beta$ ). Eutektiku přítomné v poměrně velkém obsahu (40 až 75 hm. %) zajišťuje vysokou zabíhavost, snižuje lineární smrštění, také sklon k tvorbě trhlin za tepla a sklon ke vzniku mikropórovitosti. [8]



Obr. 2 – Dílčí část rovnovážného diagramu Al-Si včetně mikrostruktur (příklady slitin A, B, C)  
Teploty tání: čistý hliník 660 °C; čistý křemík 1412 °C [4]

U slitin Al-Si **podeutektických** se s nárůstem obsahu Si směrem k eutektickému bodu (11,7% Si) zužuje interval tuhnutí, zvyšuje se zabíhavost a také sklon k soustředným staženinám. Tyto slitiny nejsou náchylné na tvorbu trhlin za tepla. Pro lití do písku, gravitační kokilové lití a nízkotlaké lití patří k nejběžnějším slitiny AlSi10Mg a AlSi7Mg v provedení bez tepelného zpracování nebo tepelně zpracovaném. Pro vysokotlaké lití se používají slitiny AlSi9Cu3 nebo AlSi8Cu3. [4]

Mezi slitiny Al-Si **eutektické** patří podle normy ČSN EN 1706 slitiny AlSi11, AlSi12 a speciální eutektická slitina AlSi12CuNiMg pro odlitky pístů. Tyto slitiny jsou charakterizovány velmi úzkým intervalem tuhnutí, vysokou zabíhavostí a sklonem k soustředným staženinám. Používají se především pro tenkostěnné odlitky, kde se kladou požadavky na vysokou tažnost plasticitu na úkor pevnosti. [4]

Slitiny Al-Si **nadeutektické** jsou charakteristické vyloučeným primárním Si v hrubých polyedrických útvarech v eutektiku. Tvrdý Si vyloučený v měkkém eutektiku zajišťuje kluzné plošky a tím jsou tyto slitiny vhodné pro odlitky pístů spalovacích motorů menších průměrů. [4]



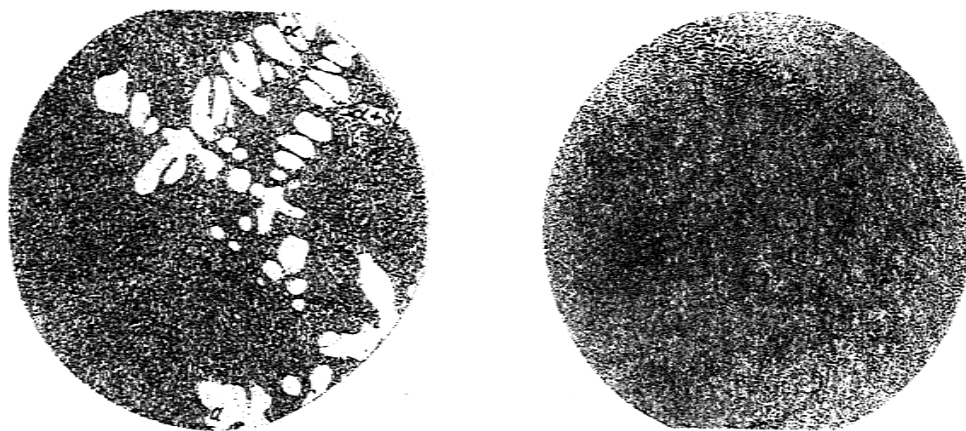
### 2.3.2.2. Modifikace slitin Al-Si

Jak již bylo předesláno, eutektikum je složeno z eutektického Si a dendritů tuhého roztoku  $\alpha(\text{Al})$ . V nemodifikované podobě je eutektický křemík vyloučen ve formě hrubých, křehkých desek a ty mají velmi negativní vliv na mechanické vlastnosti ( $R_m = 140 \text{ MPa}$ ,  $A = 1 - 2\%$ ). Proto se tyto hodnoty snažíme zvyšovat modifikací taveniny, kdy zjemňujeme krystaly Si v eutektiku, které jsou vyloučeny ve formě tyčinek až vláken. Mezi modifikační prvky zařazujeme alkalické kovy jako například sodík, lithium, stroncium.

V praxi se ovšem nejvíce využívá **sodík**, který se používá ve formě čistého kovového prvku (0,05 – 0,1% na hmotnost taveniny) nebo ve formě směsi fluoridových a chloridových solí (0,8 – 1,2% na hmotnost taveniny). Modifikační účinek odeznívá za cca 15-20 min. Ovšem nevýhodou sodíku je, že se zvyšuje nebezpečí naplynění slitiny, podporuje absorpci plynů a tím vznik rozptýlené porezity.

Dalším častěji používaným modifikačním prvkem je **stroncium**, které se dávkuje v rozsahu 0,03 – 0,06% na hmotnost taveniny a jeho výdrž modifikačního účinku je oproti sodíku výrazně vyšší, řádově je to cca 1-2 hodiny. Používá se předslitin např.  $\text{AlSi13Sr10}$  nebo  $\text{AlSr5}$ . Stroncium se chová jako absorpční prvek a brzdí růst krystalů eutektického Si v deskové formě.

Při modifikování se povrch roztaveného siluminu, který má teplotu 780 – 830°C pokrývá tenkou vrstvou modifikátoru (2 – 3%) nebo se modifikátor vmíchává do taveniny a po určité prodlevě (4-5 min.) se provede odlití siluminu. V důsledku zpožděného růstu eutektického Si klesá eutektická teplota na 569°C a tím pádem se eutektická koncentrace Si posouvá z 11,7% na cca 14% Si. [4, 8]



Obr. 3 – Slitina  $\text{AlSi11}$ , nemodifikovaný stav, 150x (vlevo) a slitina  $\text{AlSi13}$ , modifikovaný stav, 150x (vpravo) [4]





## 2.4. Vady odlitků

Vadu odlitku lze definovat jako odchylku od předepsaných rozměrů, hmotnosti, vzhledu, makro nebo mikrostruktury nebo vlastností předepsaných příslušnými normami. Vady mohou být zjevné (viditelné pouhým okem) nebo skryté (zjišťujeme vhodnými přístroji nebo laboratorními zkouškami). Dále se vady podle rozsahu a charakteru mohou považovat za nepřijatelné, přijatelné, opravitelné nebo neopravitelné. Mezi nejčastější vady patří například výronky, řediny, vměstky, zatekliny, bubliny, staženiny a smršťování.

### 2.4.1. Plyny ve slitinách hliníku

Jedním z důležitých pochodů při tavení je nebezpečí absorpce plynů z pecní atmosféry, ze zplodin hoření a okolního prostředí. Nejčastěji se obsah plynu vyjadřuje v  $\text{cm}^3$  ve 100 g taveniny. Rozpustnost plynů, především vodíku, se zvyšuje se stoupající teplotou. [4]

Plyn, který ovlivňuje jakost taveniny je **kyslík**, který se v hliníku téměř nerozpouští. Při styku roztaveného kovu s vodní párou dochází k disociaci vody a při styku kyslíku s roztavenou hladinou taveniny vzniká v kapalném i tuhém stavu tenká vrstvička oxidu hlinitého  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

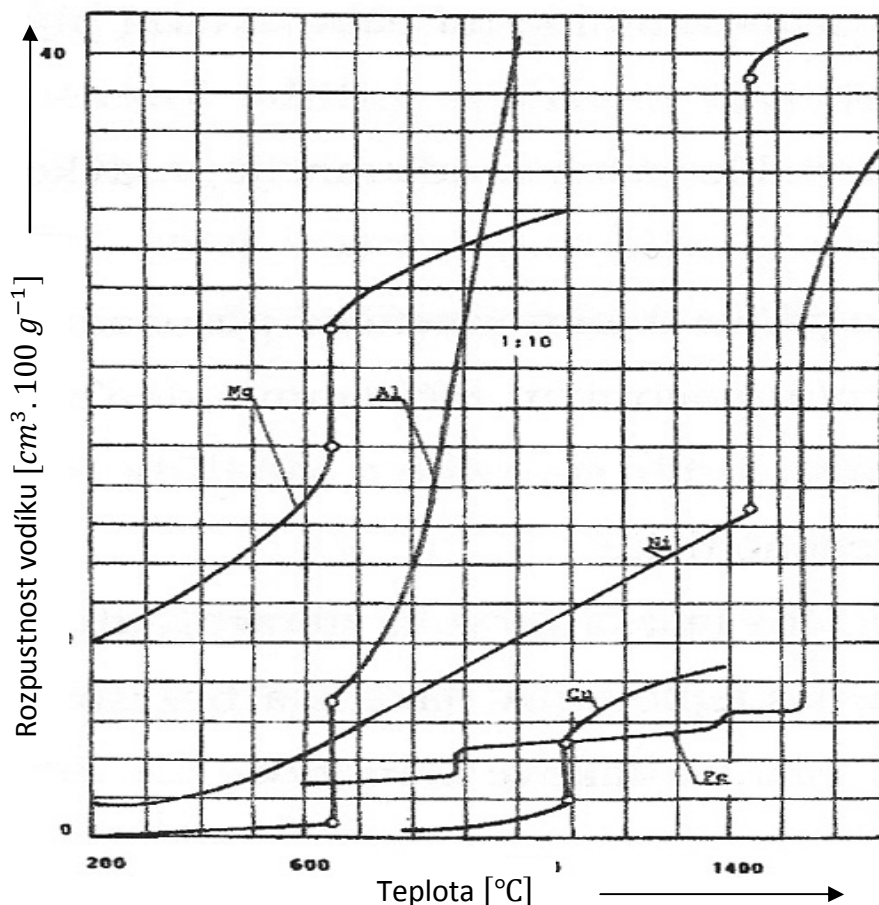
Dalším plynem je **vodík**, který představuje hlavní nebezpečí při naplynění slitin hliníku. Hlavním zdrojem vodíku je vlhkost v pecní atmosféře, v solích, vyzdívkách, špatně vysušených kelímcích a na vlhkém nářadí.

Druhou významnou složkou vzduchu je **dušík** a jako naplynující prvek je dusík neškodný; naopak je dusík vysoké čistoty považován za čistící plyn roztavených slitin hliníku a také se takto využívá. [4]

### 2.4.2. Rozpustnost vodíku ve slitinách hliníku

Rozpustnost vodíku je maximální množství vodíku, které se může za rovnovážných podmínek (při určité teplotě a tlaku) rozpustit v kovu určitého chemického složení. Skutečné množství rozpuštěného plynu může být menší, než je jeho rozpustnost (např. při tavení způsobem, který omezuje přístup vlhkosti, nebo po odplynění taveniny). Jestliže naopak je skutečný obsah vyšší, než odpovídá rozpustnosti za dané situace, uniká přebytečný plyn difuzí nebo tvoří bubliny. Snížení rozpustnosti vodíku během tuhnutí je hlavní příčinou vzniku

plynových dutin ve slitinách hliníku. Většina důležitých slitinových prvků jako Si, Zn, Cu a Mn rozpustnost vodíku snižuje, naopak Mg, Na, Ca, Li, Ti a některé další rozpustnost zvyšují. Na obr. 4 je znázorněna rozpustnost vodíku v jednotlivých průmyslových kovech. [5]



Obr. 4 – Rozpustnost vodíku ve vybraných kovech [4]

U hliníku a jeho slitin je patrný prudký pokles rozpustnosti v tuhém stavu. V rovnovážném stavu se vodík v tuhém roztoku rozpouští pouze nepatrně a jakékoliv množství nad rovnovážný stav se projeví u ztuhlé slitiny jako výskyt mikrobublin, samostatně vyloučených nebo difundovaných do mikrostaženin. [4]

### 2.4.3. Vznik plynových dutin v odlitcích

Jediným plynem, jehož rozpustnost v tekutém hliníku je technicky významná, je vodík. Má nejmenší poloměr atomu, což mu umožňuje snadný difuzní pohyb včetně difuze v tuhém stavu.

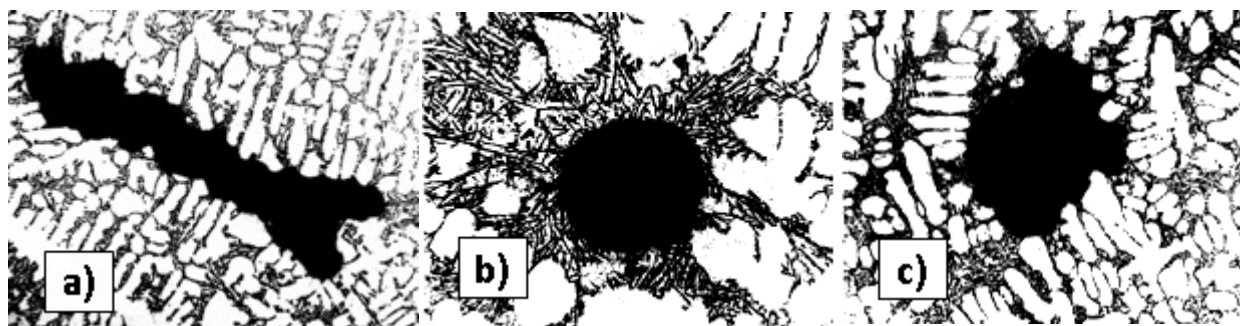
Při styku roztaveného kovu s vodní párou dochází k disociaci vody. Kyslík reaguje s hliníkem za tvorby oxidu hlinitého a vodík se v roztaveném kovu rozpouští. Reakce probíhá podle rovnice:



Změna rozpustnosti vodíku při tuhnutí má za následek vznik bublin, neboli drobných dutin, které se vyskytují v odlitcích z hliníkových slitin a obvykle se označují termínem póry a vznikají jako slévárenská vada zvaná bublinatost nebo **porezita** (viz obr. 5). Porezita bývá způsobena kombinací tvorby mikrostaženin a bublin.

Při pomalém tuhnutí difunduje vodík do bublin na poměrně velké vzdálenosti a vznikají tak velké **bublíny** (viz obr. 5), které nemají téměř žádnou vazbu na krystalickou strukturu kovu. Při rychlém postupu krystalizační fronty se bubliny brzy obalí vrstvou tuhého kovu, aniž by mohlo difuzí vodíku v tavenině dojít k jejich dalšímu růstu. Výsledkem je vznik malých kulovitých nebo protáhlých bublin, uzavřených v mezidendritických prostorech kovu – tzv. **mikrostaženiny** (viz obr. 5).

Póry se typicky vyskytují v mezidendritických prostorech, které jsou posledním místem odlitku, kde dochází k tuhnutí. Porezita je problémem především u slitin, které mají široký interval tuhnutí. [4, 5]



Obr. 5 - Tvar pórů ve slitinách Al: a) mikrostaženina  
b) plynová bublina  
c) porezita (mikrostaženina + plyn) [5]



#### 2.4.4. Vliv porezity na vlastnosti odlitků

Ve slévárnách hliníku patří porezita k nejčastějším vadám. Proto mnoho zásad tavení a metalurgických operací je zaměřeno na dosažení nízkého stupně naplynění taveniny. Snížení obsahu plynů v hliníkových slitinách se provádí obvykle vakuováním taveniny nebo probubláváním taveniny aktivními nebo neaktivními plyny. Vady způsobené plynovými dutinami jsou obvykle neodstranitelné.

Porezita zhoršuje celou řadu užitných vlastností hliníkových odlitků, zejména pevnostní vlastnosti, kdy se snižuje pevnost i tažnost. Póry jsou iniciačními místy pro vznik únavových lomů (snížené únavové vlastnosti). A dále ovlivňují těsnost odlitků, kvalitu obrobených ploch a povrchovou úpravu odlitků. [5]

### 3. Nedestruktivní zkoušení

Nedestruktivní zkoušení neboli také používaná zkratka NDT (Non-Destructive Testing) spočívá ve zkoušení určitého druhu materiálu nebo součásti, aniž by došlo k porušení celistvosti a následné nepoužitelnosti nebo ovlivnění schopnost plnit předpokládanou funkci. Metody NDT využívají přiměřenou formu energie pro stanovení materiálových vlastností nebo pro indikování přítomnosti materiálových nespojitostí (povrchových nebo vnitřních). [2]

#### 3.1. Metoda vířivých proudů

Metoda vířivých proudů je založena na stanovení změn fyzikálních vlastností materiálu pomocí střídavého magnetického pole. Tato metoda spočívá v tom, že zkoušený objekt, jenž má určitou elektrickou vodivost, magnetickou permeabilitu a určité rozměry, se vystaví působení střídavého magnetického pole, které je vytvářeno budicí cívkou, napájenou střídavým proudem. Zkoušený objekt se v poli zmagnetuje a indukují se vířivé proudy, které svým magnetickým účinkem působí podle Lenzova zákona zpětně na magnetické pole budicí cívky a zeslabují ho. Tato dvě magnetická pole (primární od budicí cívky a reakční od vířivých proudů) se vektorově skládají ve výsledné pole, které závisí na elektrické vodivosti a magnetické permeabilitě zkoušeného objektu. Toto výsledné pole se snímá buď přímo v cívce, která budí střídavé magnetické pole, kdy cívkový systém má jedno vinutí a vyhodnocuje se změna impedance cívky  $Z$  (tj. její odpor, který klade střídavému proudu) nebo sekundární cívkou (cívkový systém má dvě vinutí – budicí a snímací), kde se indukuje



výsledné indukované napětí, které je závislé především na frekvenci budícího proudu (s rostoucí frekvencí se zvyšuje velikost vířivých proudů) ale také na tvaru, struktuře a elektricko-magnetických vlastností objektu. Vyhodnocuje se amplituda a fáze napětí na snímacím vinutí.

Defekty snižují elektrickou vodivost zkoušeného materiálu a vířivé proudy defekty obtékají, tím se prodlužují dráhy vířivých proudů a rovněž se snižuje i jejich hustota. Následně se snižuje intenzita zeslabení budícího pole, takže intenzita výsledného pole a s ní i indukované napětí na snímací cívce stoupne. Zvýšená amplituda napětí svědčí o výskytu defektu.

Metodu vířivých proudů lze použít u všech druhů elektricky vodivých materiálů (feromagnetických i neferomagnetických). Mezi výhody by se dala řadit relativně levná kontrola oproti jiným technologiím NDT, možnost automatizace kontrolního provozu, před kontrolou není nutno upravovat povrch zkušební tělesa, poměrně vysoká rychlost plynulého zkoušení a ta je pro správnou diagnostiku vad přímo nutností, protože k vyvolání vadového signálu je potřeba, aby sonda a zkoušený objekt byly navzájem v pohybu. Čím více je tento pohyb rychlejší, tím vyšší a snadněji rozpoznatelný impulz dostaneme na stínítku obrazovky. Mezi nemalou nevýhodu patří nemožnost indikace vad hluboko pod povrchem. [1,2]

### 3.1.1. Povrchový jev

Vířivé proudy jsou uzavřené smyčky indukovaného proudu obíhající v rovinách kolmých k magnetickému toku. Vířivé proudy se soustředí blízko povrchu a jejich síla se snižuje s vzdáleností od cívky. Hustota vířivého proudu se snižuje exponenciálně s hloubkou. A tento úkaz je známý jako povrchový jev.

K vyjádření povrchového jevu se udává tzv. hloubka vniku. Je to vzdálenost pod povrchem, kde hodnota pole je  $e$ -krát menší než na povrchu vzorku ( $e = 2,718$ ). To znamená, že je snížena na poměrnou úroveň  $1/e = 0,368$  oproti hodnotě 1,0 na povrchu. Rozdělení hustoty vířivých proudů po průřezu zkoušeného materiálu je velmi nerovnoměrné. V ose tyče je hustota vířivých proudů nulová, největší je na povrchu. [2]

Pro přibližnou představu slouží tzv. **standardní hloubka vniku**  $s[m]$ :

$$s = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \mu_r \sigma}} \quad (2)$$

kde:

$\omega = 2\pi f$  - kruhová frekvence střídavého magnetického pole [ $rad.s^{-1}$ ]

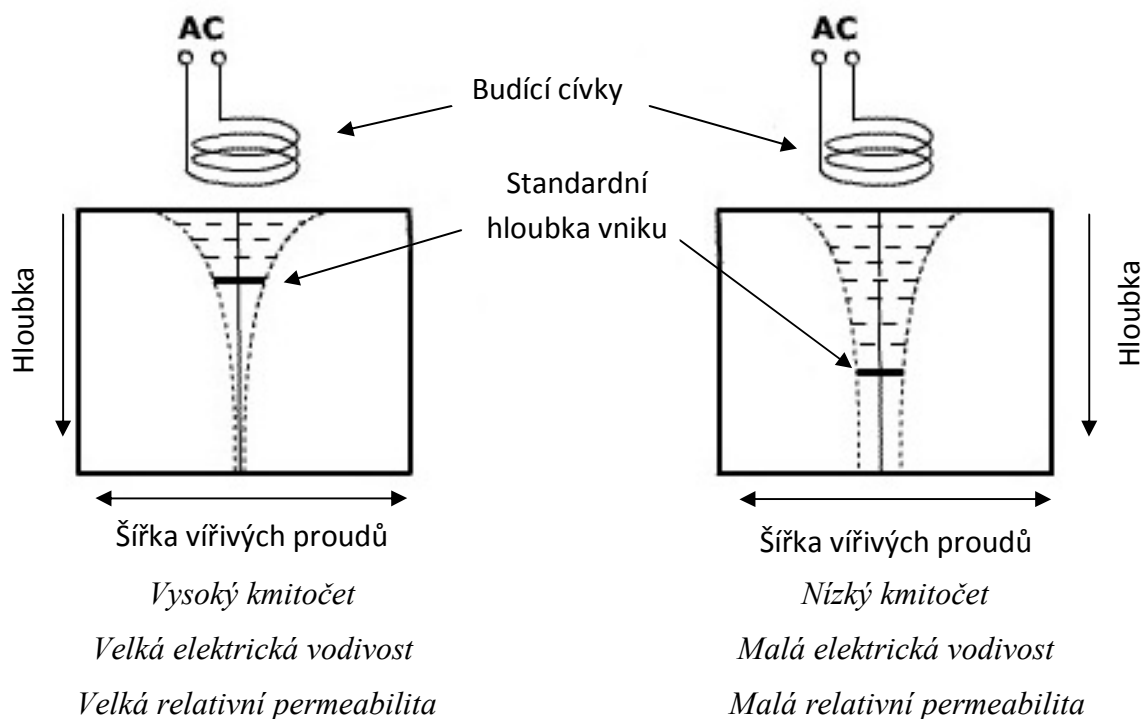
$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  - permeabilita vakua [ $H.m^{-1}$ ]

$\mu_r$  - relativní permeabilita [-]

$\sigma$  - měrná vodivost [ $S.m^{-1}$ ]

$f$  - frekvence budícího proudu [Hz] [2]

Ovšem tento vztah platí pro materiál rovinného povrchu s velkou tloušťkou. Při použití nízké frekvence je hustota vířivých proudů celkově nízká, avšak proudy zasahují větší část průřezu. U vysokých frekvencí je naopak hustota vířivých proudů vysoká, ale pouze v poměrně tenké povrchové vrstvě (*obr. 6*). V *tab. 3* jsou znázorněny frekvence a následné hloubky vniku pro některé kovy. [2]



Obr. 6 – Průnik vířivých proudů do materiálu



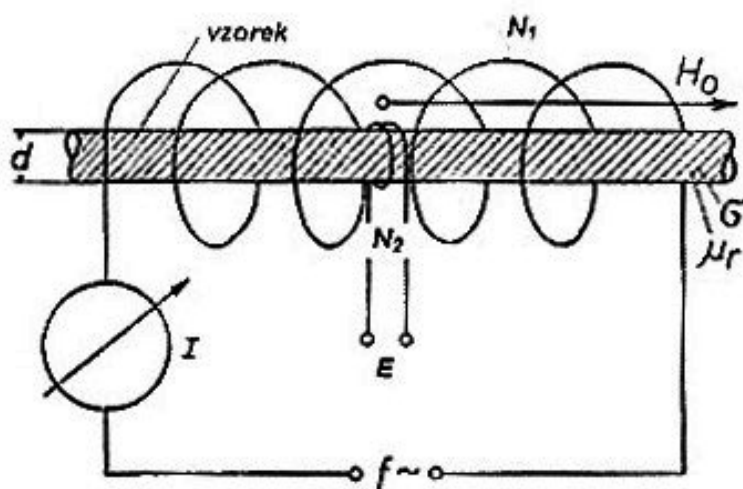
f	Fe $\mu_r = 2,5$	Fe $\mu_r = 100$	Hliník Al	Měď Cu
3 Hz	58,1	9,19	49,1	39,2
30 Hz	18,4	2,90	15,5	12,4
300 Hz	5,8	0,91	4,90	3,9
1 kHz	3,19	0,50	2,70	2,15
3 kHz	1,84	0,29	1,55	1,24
30 kHz	0,58	0,09	0,49	0,39
300 kHz	0,18	0,03	0,15	0,12

Tab. 3 – Hloubka vniku vířivých proudů v mm pro některé kovy [2]

### 3.1.2. Uspořádání cívek

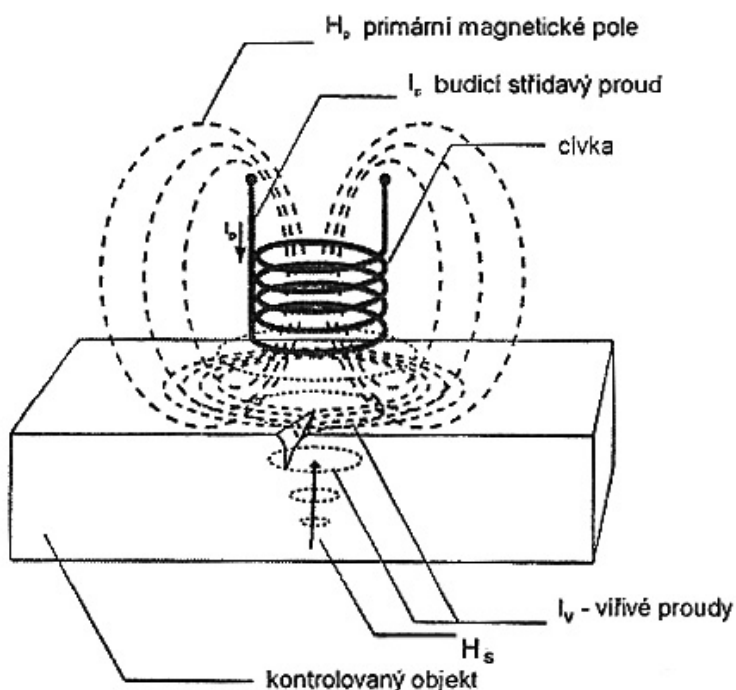
U nedestruktivního zkoušení metodou vířivých proudů dělíme uspořádání snímacích cívek vzhledem ke kontrolovanému objektu dvěma způsoby – tzv. metodou s průchozí cívkou a metodou s příložnou cívkou. [2]

Metoda s **průchozí cívkou** spočívá v umístění kontrolovaného objektu do středu budící cívky, kdy primárním magnetizačním vinutím  $N_1$  prochází střídavý proud a ve vzorku se tak vytvářejí vířivé proudy. Jak již zde bylo zmíněno, vzniká tak výsledné pole, které na sekundární cívkou  $N_2$  indukuje napětí, jehož velikost závisí na strukturních a fyzikálních vlastnostech materiálu zkoumaného objektu. Poté se změřené napětí na sekundární cívkou porovná se hodnotou napětí etalonu. Tato metoda je vhodná pro kontrolu tyčového materiálu (válcované profily, šrouby, dráty, čepy aj.). [2,7]



Obr. 7 – Princip metody  
s průchozí cívkou [2]

U metody s **příložnou cívkou** se budící magnetizační cívka, kterou prochází střídavý proud, přikládá v radiálním směru k povrchu zkoušeného objektu. Magnetické pole vířivých proudů zpětně ovlivňuje vlastnosti přikládané cívky a způsobuje změnu její impedance. Zpětné působení vířivých proudů bude opět souviset kromě napájecí frekvence a fyzikálními vlastnostmi zkoušeného objektu také na vzdálenosti cívky od povrchu objektu a na tloušťce měřeného vzorku. Touto metodou se měří především velké a neprizmatické součásti. [2,7]



Obr. 8 – Princip příložné cívky [2]





## 4. Hodnocení míry porezity vzorků

### 4.1. Příprava vzorků ze slitiny AlSi11

Pro přípravu vzorků byla použita normalizovaná slitina AlSi11. Chemické složení této slitiny je uvedeno v *tab. 4*.

Slitina	Označení slitiny		Chemické složení v % hmotnosti							
			Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Hliník
AlSi	EN AC-44000	EN AC-AlSi11	10,0 – 11,8	0,15	0,03	0,10	0,45	0,07	0,15	Zbytek

*Tab. 4 – Chemické složení dané slitiny*

Tavení materiálu probíhalo v kelímkové indukční peci PIT 50s/400. Materiál byl roztaven a přehřán na teplotu 730°C, následně byl vléván pomocí lžice do spodní poloviny formy o rozměrech 200x100x50 mm. Forma byla připevněna na hydraulickém lisu PHM – 250C a vyhřátá na teplotu 150°C. Na její povrch byla nanесena ochranná vrstva koloidního grafitu, která měla za úkol zabránit přichycení taveniny k formě. Následně byl spuštěn lisovací razník, forma se uzavřela a probíhalo lisování. Vznikly tedy odlitky o rozměrech 200x100x25 mm. Lisovací tlak na odlitek působil 50 sekund a po této době razník přestal vyvíjet tlak na formu a odlitek byl vyhozen pomocí čtyř vyhazovačů umístěných v rozích formy. Odlitky byly připravené dvojím způsobem, **pod tlakem 60MPa** a metodou **gravitační**, vždy při teplotě formy kolem 150°C.

Další odlitky byly připravené ze slitiny modifikované stronciem – AlSr10 s množstvím 0,05% Sr. Modifikující prvek byl přidán do slitiny po jejím přehřátí na 730°C, následně byla připravena lázeň o stejné teplotě, do které se předslitina na 10 minut ponořila s cílem homogenizace chemického složení. Z takto zpracovaného kovu byly připravované vzorky při stejných podmínkách jako při přípravě vzorků z nemodifikované slitiny.

V *tab. 5* je uvedeno označení vzorků a způsob jejich přípravy. Pro měření byly vybrány vzorky ze střední části odlité desky (s označením W) a z okrajové části odlité desky (označení Z). Vybrané vzorky byly na všech plochách obrobeny (frézovány).



Označení vzorku	Místo odebrání vzorku	Stav slitiny	Obsah modifikátoru [%]
1W	Střed	nemodifikovaný, odlévaný gravitačně	-
1Z	Okraj		
2W	Střed	nemodifikovaný, odlévaný pod tlakem 60 MPa	-
2Z	Okraj		
3W	Střed	modifikovaný, odlévaný gravitačně	0,05
3Z	Okraj		
4W	Střed	modifikovaný, odlévaný pod tlakem 60 MPa	0,05
4Z	Okraj		

Tab. 5 – Značení vzorků a způsob jejich přípravy

## 4.2. Zjišťování vad materiálu přístrojem SIGMATEST 2.069

SIGMATEST 2.069 je přenosný vířivoproudý přístroj, který slouží k rychlému a spolehlivému měření elektrické vodivosti všech neželezných kovů na základě komplexní impedance měřicí sondy. Měřicí rozsah přístroje je stanoven kalibrací. Pokud je měřen neznámý zkušební díl, přístroj převede hodnotu komplexní impedance na hodnotu elektrické vodivosti. Hodnota elektrické vodivosti je indikována na LCD displeji. Přístroj má veliký měřicí rozsah 0,5 – 65  $MS/m$  (1% – 112%  $IACS$ ) a umožňuje nastavení až pěti volitelných frekvencí (60/120/240/480/960  $kHz$ ).

Sada s přístrojem obsahuje dva kusy etalonů pro kalibraci předcházející samotnému měření. Použití etalonů při kalibraci umožňuje velice přesné měření napříč celým rozsahem měrné elektrické vodivosti.

Přístroj lze dále používat ke zjišťování celé řady vad a charakteristik materiálu jako například stanovení míry tepelného zpracování a stupně čistoty kovů, kontrolu pevnosti a tvrdosti kovů a v neposlední řadě také ke třídění neželezných kovů, například v kovošrotech. [9]

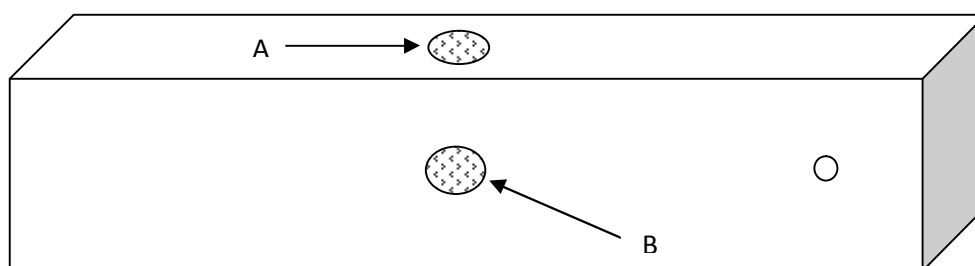


Obr. 9 – Přístroj SIGMATEST 2.069 [9]

### 4.2.1. Zjišťování míry porezity vzorků prostřednictvím úbytku vodivosti

Pro stanovení vodivosti byla použita 8 mm příložná sonda. Tato sonda pracuje na principu měření změny vodivosti materiálu, v jehož objemu se vyskytují různé necelistvosti (dutiny, póry apod.). Každá dutina je vyplněna vzduchem, což je v podstatě izolant, který zvyšuje elektrický odpor zkoušeného materiálu – tj. se zvyšujícím počtem dutinek bude klesat elektrická vodivost materiálu, která je naměřena sondou. Úbytkem této vodivosti lze po srovnání s etalonem odhadnout rozsah porezity zkoušených vzorků. Jako kalibrační etalon pro nastavení rozsahu přístroje SIGMATEST 2.069 byla použita **žíhaná měď** s elektrickou vodivostí  $58,35 \text{ MS/m}$ .

Vzorky byly měřeny na dvou místech (*obr. 10*) přístrojem SIGMATEST 2.069. Měřený vzorek je na *obr. 10* orientován tak, jak byl uložen v licí formě. V místě B by se tedy měla nacházet tepelná osa odlitku, kde by se mělo vyskytovat více pórů a tudíž i snížená elektrická vodivost.



Obr. 10 – Měřený vzorek pomocí přístroje SIGMATEST 2.069

Nastavená velikost frekvence budícího proudu na přístroji byla  $120 \text{ kHz}$ , relativní permeabilita pro hliník činí  $\mu_r = 1,000\,023$  a průměrná hodnota vodivosti z naměřených vzorků činila hodnotu  $\sigma = 17,81 \text{ MS/m}$ . Výpočet průměrné hloubky vniku je vyjádřen pomocí rovnice (1), (viz *str. 22*) – tzv. **standardní hloubky vniku**, která je následně upravena do tvaru:

$$s = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \mu_r \sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \mu_r \sigma}} = \frac{503,3}{\sqrt{f \cdot \mu_r \sigma}} = \frac{503,3}{\sqrt{120 \cdot 10^3 \cdot 1,000\,023 \cdot 17,81 \cdot 10^6}} =$$

$$= 0,0003442 \text{ m} \doteq 0,34 \text{ mm} \quad (3)$$

Vypočítaná průměrná **hloubka vniku vířivých proudů** do zkoumaných vzorků byla podle vzorce spočtena na hodnotu  $h = 0,34 \text{ mm}$ .



Výsledky měření vodivosti vzorků prostřednictvím experimentálního přístroje SIGMATEST jsou uvedeny v *tab. 6*. Vodivost hliníku o vysoké čistotě se pohybuje okolo 35,5 – 38 MS/m. Přesnost měřicího přístroje SIGMATEST je  $\pm 0,5 \%$  z měřené hodnoty.

Označení vzorků	Naměřená vodivost [MS/m]	
	Místo A	Místo B
1W	16,44	16,21
1Z	16,86	16,76
2W	20,12	18,30
2Z	17,91	15,91
3W	16,11	15,91
3Z	16,85	16,25
4W	19,89	17,92
4Z	19,70	17,61
<b>Kalibr (měď)</b>	<b>58,35</b>	

*Tab. 6 – Naměřená vodivost vzorků experimentálním přístrojem SIGMATEST 2.069*

*(místo B reprezentuje tepelnou osu odlitku)*

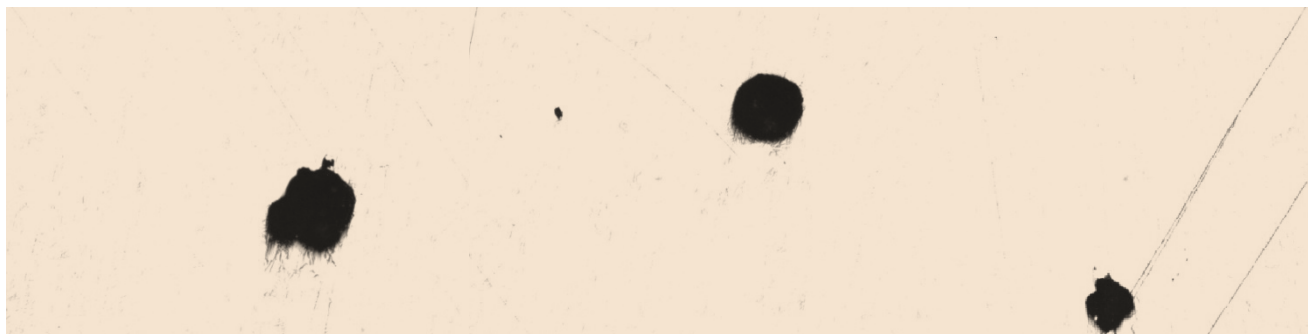
### 4.3. Hodnocení porezity vzorků pomocí programu NIS-Elements 2.30

Jako nejobjektivnější metoda pro zjištění míry porezity je elektronické hodnocení pomocí programu NIS-Elements 2.30. Tato metoda ovšem vyhodnocuje porezitu pouze v místě řezu výbrusu (tj. lokální porezitu). Lze však předpokládat, že tato lokální kvantifikace míry porezity platí s drobnými odchylkami pro celý objem zkoumaného vzorku.

Při metalografickém prozkoumání výbrusu vzorku se póry jeví jako tmavé plochy, zatímco ničím neporušený materiál bez jakýchkoliv vad bude mít barvu světlejší. A právě na této diferenci program NIS-Elements 2.30 pracuje. Při hodnocení porezity vychází ze vzájemného poměru velikosti tmavých a světlých ploch. Výsledná hodnota lokální porezity je získána sečtením obsahů tmavých ploch (*viz. obr. 11*).

Velikost nejmenších pórů se pohybovala okolo 20  $\mu m$  a největší póry byly velké až 260  $\mu m$ .

Kvantifikace porezity na metalografických výbrusech se prováděla na optickém mikroskopu NEOPHOT 32, který byl opatřený digitálním fotoaparátem NIKON COOLPIX 4500. Při snímání povrchu vzorků bylo použito padesátinásobné zvětšení.



Obr. 11 – Příklad mikroskopické kvantifikace pórovitosti vzorků pomocí programu NIS-Elements 2.30 – (50x zvětšeno)

Na zkoumaných výbrusech o velikosti plochy 20x20 mm byla porezita hodnocena na ploše 3x3 mm a to jak ve **středu** výbrusu, tak i u **okraje** výbrusu. Vyhodnocení míry porezity vzorků prostřednictvím programu NIS- Elements 2.30 je uvedeno v tab. 7 a 8:

Vzorek (střed výbrusu)	Pórovitost [%]
1W	1,3
1Z	0,2
2W	0,02
2Z	0,1
3W	1,1
3Z	1,1
4W	0,06
4Z	0,03

Tab. 7 – Kvantifikace porezity vzorků hodnocená ve středu výbrusu

Vzorek (okraj výbrusu)	Pórovitost [%]
1W	1,2
1Z	0,2
2W	0,02
2Z	0,02
3W	1,2
3Z	0,5
4W	0,02
4Z	0,2

Tab. 8 – Kvantifikace porezity vzorků hodnocená u okraje výbrusu

## 5. Popis mikroskopických struktur vybraných vzorků

Pro popis struktur byly vybrány vzorky odlévané různými technologiemi – jedná se o vzorky odlévané **gravitačně** a **pod tlakem 60 MPa**. Pro obě tyto technologie byly použity slitiny modifikované a nemodifikované stronciem Sr. Vybrané mikroskopické struktury byly použity u vzorků odebraných ze středu odlité desky.



*Obr. 12 – Vzorek 1W (odlévaný gravitačně – nemodifikovaný stav) – zv. 500x*

Struktura vzorku 1W obsahuje primární dendritické krystaly  $\alpha$  (Al) a eutektikum  $\alpha$ (Al) + Si, kde je křemík vyloučen ve formě hrubých jehlic s výraznými negativními vlivy na mechanické vlastnosti, protože tvar eutektického křemíku Si výrazně ovlivňuje hlavně pevnost v tahu  $R_m$  a tažnost  $A_{50}$ .





*Obr. 13 – Vzorek 2W (odlévaný pod tlakem – nemodifikovaný stav) – zv. 500x*

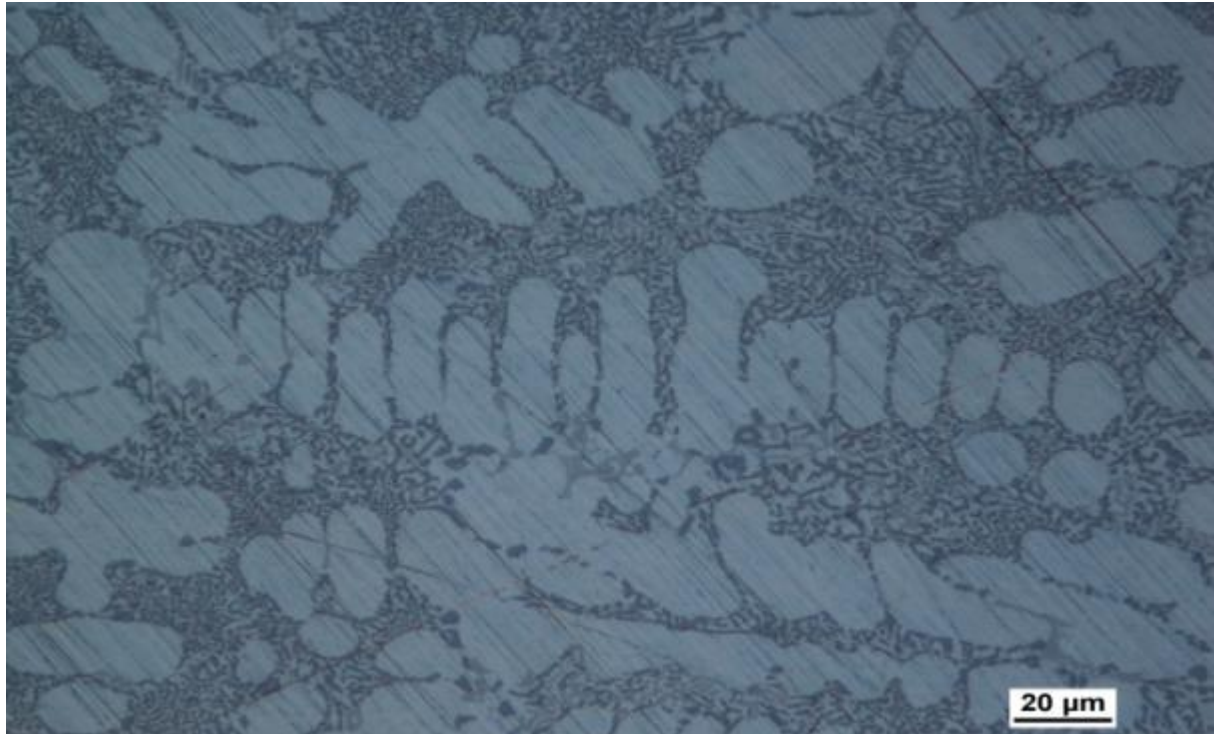
Struktura vzorku 2W obsahuje výrazně odlišnou strukturu, což je zapříčiněno jinou metodou použité technologie odlévání – tlakové lití. Strukturu tvoří primární dendritické krystaly  $\alpha$  (Al) a eutektikum  $\alpha$  (Al) + Si, kde je vyloučený křemík Si jemnější, což má za následek větší tvrdost, ale i lepší mechanické vlastnosti oproti vzorku 1W na předchozí straně.



*Obr. 14 – Vzorek 3W (odlévaný gravitačně – modifikovaný stav) – zv. 500x*

U vzorku 3W je struktura složena opět z tuhého roztoku  $\alpha$  (Al), který má jemnější tvar a eutektikum má zrnitý tvar. To je především dáno vlivem modifikace stroncia Sr, protože

stroncium brzdí růst krystalů eutektického Si v deskové formě. Struktura také obsahuje primární polyedrické krystaly Si.



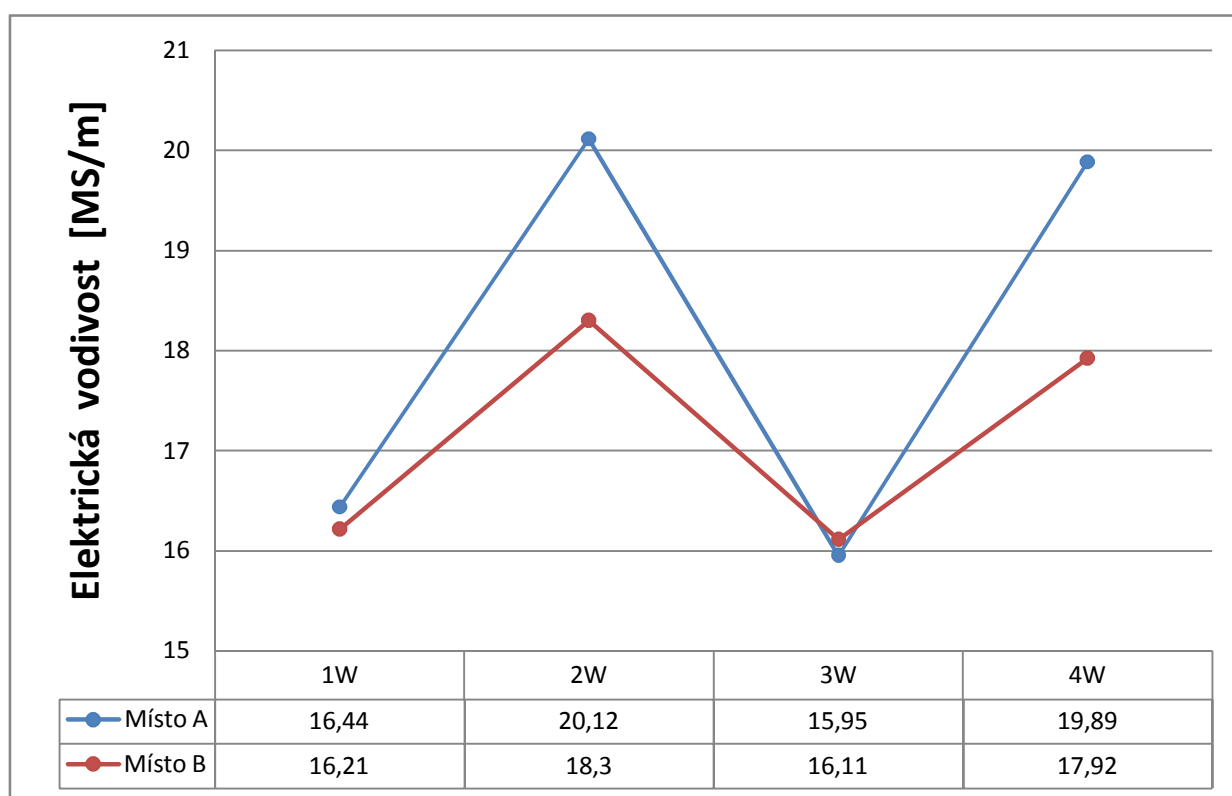
*Obr. 15 – Vzorek 4W (odlévaný pod tlakem – modifikovaný stav) – zv. 500x*

Struktura vzorku 4W je obdobná jako u vzorku 3W – opět je jeho struktura tvořena primárními dendritickými krystaly  $\alpha$  (Al) + eutektika  $\alpha$  (Al) + Si, které má zrnitý tvar. Eutektikum vzorku 4W je nejjemnější ze všech zde popsaných struktur, proto tento vzorek bude dosahovat lepších mechanických hodnot, než předešlé struktury vzorků a opět je toho docíleno vlivem modifikací slitiny stronciem.

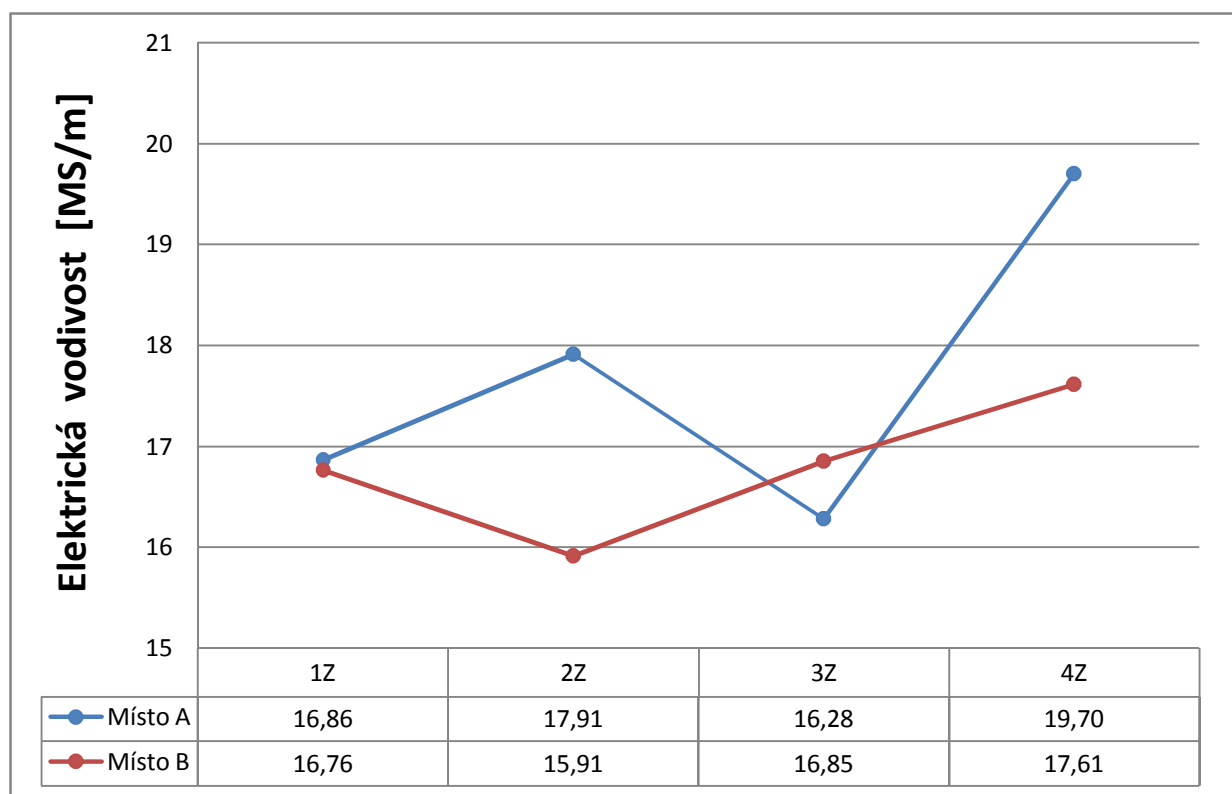


## 6. Diskuze

Cílem této bakalářské práce bylo vyhodnotit míru porezity na opatřených vzorcích pomocí nedestruktivní metody vířivých proudů a také mikroskopickou kvantifikací vzorků. Hodnocení míry pórovitosti daných vzorků bylo prováděno prostřednictvím úbytku vodivosti experimentálním přístrojem SIGMATEST 2.069. Naměřené hodnoty vodivosti jednotlivých vzorků přístrojem SIGMATEST 2.069 jsou vyjádřeny v *grafech 1 a 2*, kde na vodorovné ose jsou vyznačeny vybrané vzorky označené tečkami vzhledem k jejich odpovídající naměřené vodivosti jednotlivých vzorků.



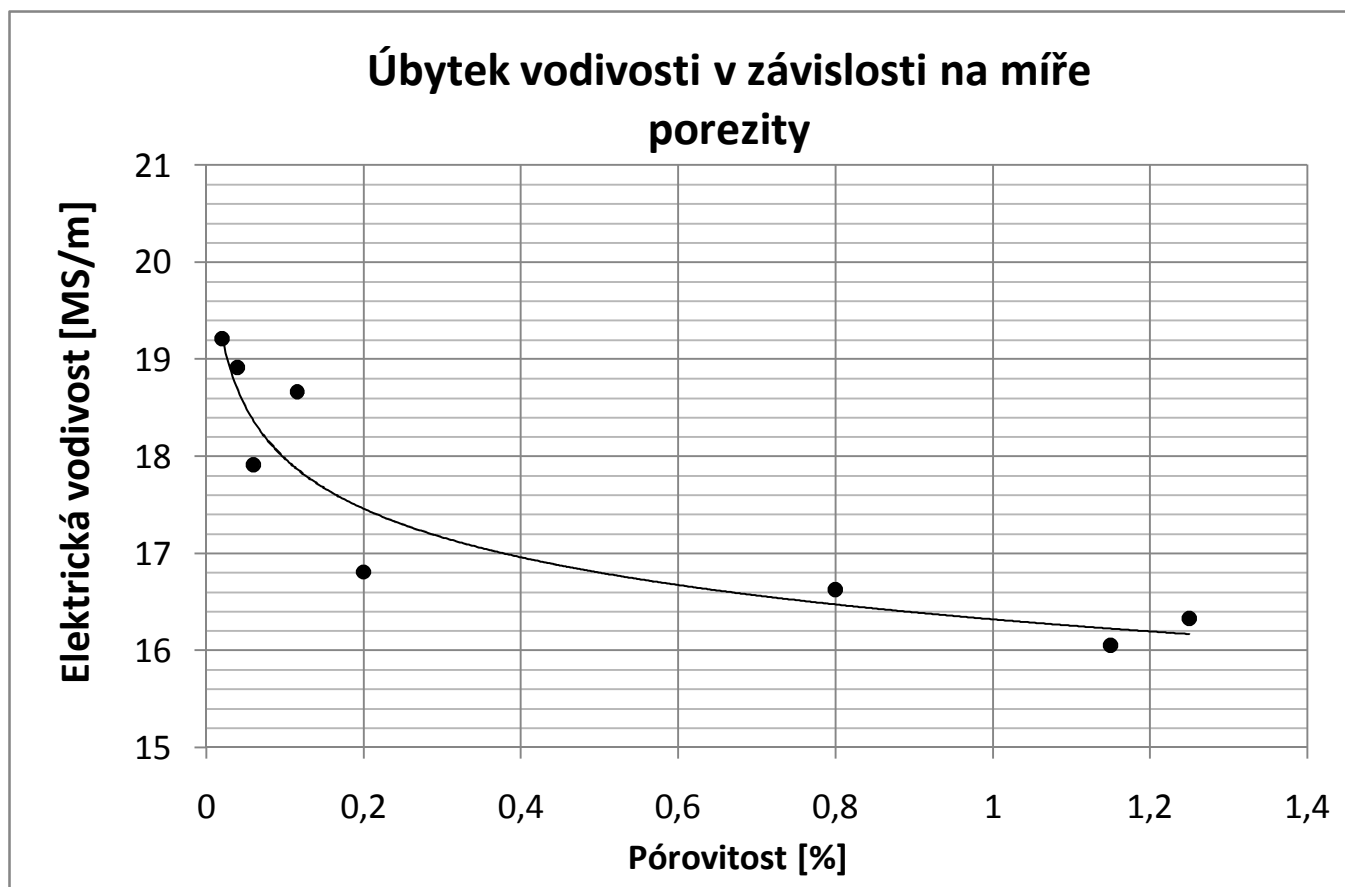
*Graf 1 – Naměřená vodivost vzorků odebraných ze středu odlité desky  
(místo B – tepelná osa vzorků)*



Graf 2 – Naměřená vodivost vzorků odebraných z okraje odlité desky  
(místo B – tepelná osa vzorků)

Z těchto grafů je možné vypožorovat, že vzorky **2W**, **2Z** a **4W**, **4Z** – tj. vzorky odlévané pod tlakem (2 – nemodifikované, 4 – modifikované) vykazují poměrně odlišné hodnoty naměřené vodivosti. Naopak vzorky **1W**, **1Z** a **3W**, **3Z** odlévané gravitačně (1 – nemodifikované, 3 – modifikované) téměř žádný rozdíl vodivosti nevykazují. Z tabulky pod *grafem 1* a *2* lze pozorovat, že jde pouze o řádově desetiny.

U měřených vzorků, které byly odlévány **pod tlakem**, je tedy viditelné, že v místech B (tepelné ose) je větší pokles vodivosti vzorků. Toto snížení vodivosti mohlo být způsobeno větším množstvím těsně podpovrchových necelistvostí (pórů), které se především nejvíce vyskytují v tepelných osách odlitků, nebo to mohlo být způsobeno následkem jemnější struktury vzorků, které byly odlévány pod tlakem. Jelikož průměrná hloubka průniku vířivých proudů do materiálu byla pouze 0,34 mm nelze zcela objektivně posoudit míru pórovitosti daných vzorků. Jde tedy pouze informativní hodnoty, které udávají v jistých místech nějaké podpovrchové necelistvosti, a také udávají, aby směr dalších měření směřoval právě do míst, kde se vodivost liší.



Graf 3 – Závislost úbytku vodivosti na procentuálním výskytu podpovrchových pórů

Naměřené body v grafu 3 lze nejlépe proložit mocninnou křivkou funkce o rovnici  $y = 16,31x^{-0,04}$ , kde  $y$  představuje hodnotu elektrické vodivosti vzorků a  $x$  procento pórovitosti (koeficient korelace činí  $R = 0,9370$ ). Po transformaci regresní funkce se získá tvar:

$$x = \sqrt[{-0,04}]{\frac{y}{16,31}} = \left(\frac{y}{16,31}\right)^{-25} \quad (4)$$

kde za proměnnou  $y$  se dosadí hodnota elektrické vodivosti vzorků a  $x$  vyjde hledaná procentuální pórovitost, která je vyjádřena v tab. 9

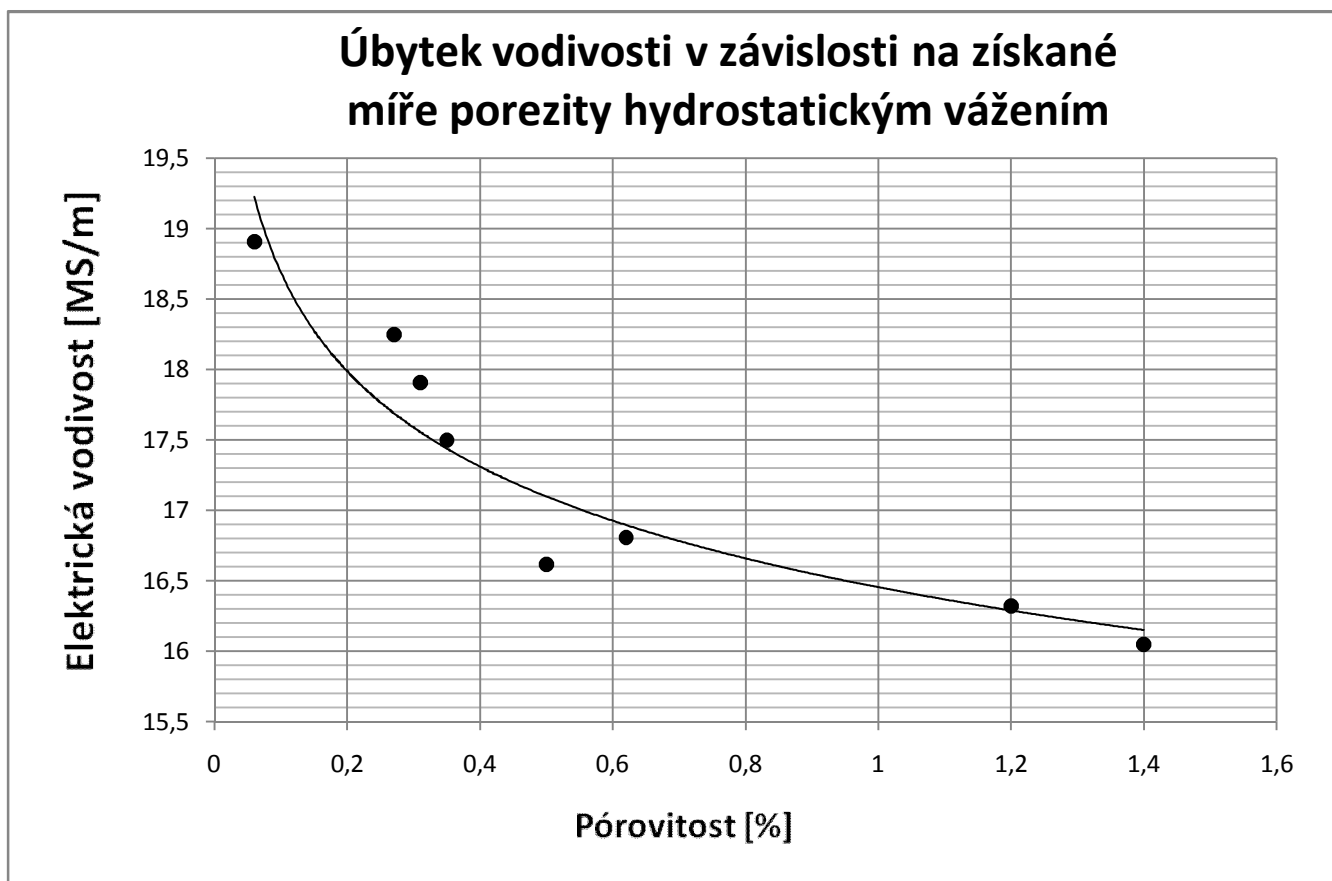


Označení vzorku	Průměrná skutečná pórovitost vzorků [%]	Předpokládaná (spočítaná) pórovitost [%]	Absolutní odchylka spočítané a naměřené pórovitosti [%]
2W	0,02	0,017	0,003
4W	0,04	0,025	0,015
2Z	0,06	0,096	0,036
4Z	0,115	0,035	0,080
1Z	0,2	0,470	0,270
3Z	0,8	0,625	0,175
3W	1,15	1,494	0,344
1W	1,25	0,970	0,280
			<b><math>\Phi = 0,150 \%</math></b>

*Tab. 9 – Porovnání hodnot průměrné skutečné pórovitosti a pórovitosti spočítané pomocí regresní funkce*

Jednotlivé body předpokládané (spočítané) pórovitosti se od průměrné skutečné pórovitosti vzorků liší v případě použitého matematického modelu v průměru o 0,150 %.

K porovnání správnosti metalograficky naměřené porózy a míry porezity měřené úbytkem vodivosti prostřednictvím vířivých proudů nadále sloužily hodnoty porezity, které byly určeny pomocí metody hydrostatického vážení. Tyto hodnoty se podařilo získat z Technické univerzity v Polsku a jsou uvedené v *tab. 10*.



*Graf 4 – Závislost úbytku vodivosti a získané porozity zjištěné hydrostatickým vážením*

Jednotlivé body porozity metalografickou metodou se od porozity metodou hydrostatického vážení vzorků liší o 0,241 %. Rozdíl těchto hodnot mohl být způsobený nepřesnostmi měření použitých metod. Metoda hydrostatického vážení mohla být ovlivněna nepřesnými výpočty objemů vzorků. U metody metalografické pak rozdíl mohlo způsobit nerovnoměrné rozložení pórů v materiálu.

V grafu 4 jsou zobrazeny hodnoty naměřeného úbytku vodivosti prostřednictvím vířivých proudů a hodnoty porozity získaných z polské Technické univerzity. Nejvhodnější křivka pro proložení grafu 4 byla opět mocninná křivka o rovnici  $y = 16,45x^{-0,05}$ , kde  $y$  představuje hodnotu elektrické vodivosti měřených vzorků a  $x$  procento získané porozitosti polské Technické univerzity. Koeficient korelace je skoro o desetinu větší než na z metalograficky měřené porozitě (koeficient korelace pro tento případ činí  $R = 0,9446$ ). Po transformaci regresní funkce se získá tvar:

$$x = \sqrt[{-0,05}]{\frac{y}{16,45}} = \left(\frac{y}{16,31}\right)^{-20} \quad (5)$$



kde za proměnnou  $y$  se dosadí hodnota elektrické vodivosti vzorků a  $x$  vyjde příslušná procentuální pórovitost.

Označení vzorku	Porezita [%] (metalografická metoda)	Porezita [%] (metoda hydrostatického vážení)	Absolutní odchylka spočítané a naměřené pórovitosti [%]
2W	0,02	0,27	0,25
4W	0,04	0,06	0,02
2Z	0,06	0,29	0,23
4Z	0,115	0,35	0,235
1Z	0,2	0,91	0,71
3Z	0,8	0,98	0,18
3W	1,15	1,4	0,25
1W	1,25	1,2	0,05
			<b><math>\Phi = 0,241 \%</math></b>

*Tab. 10 – Porovnání míry porézity zjištěné metalografickou metodou a porézity získané hydrostatickým vážením*

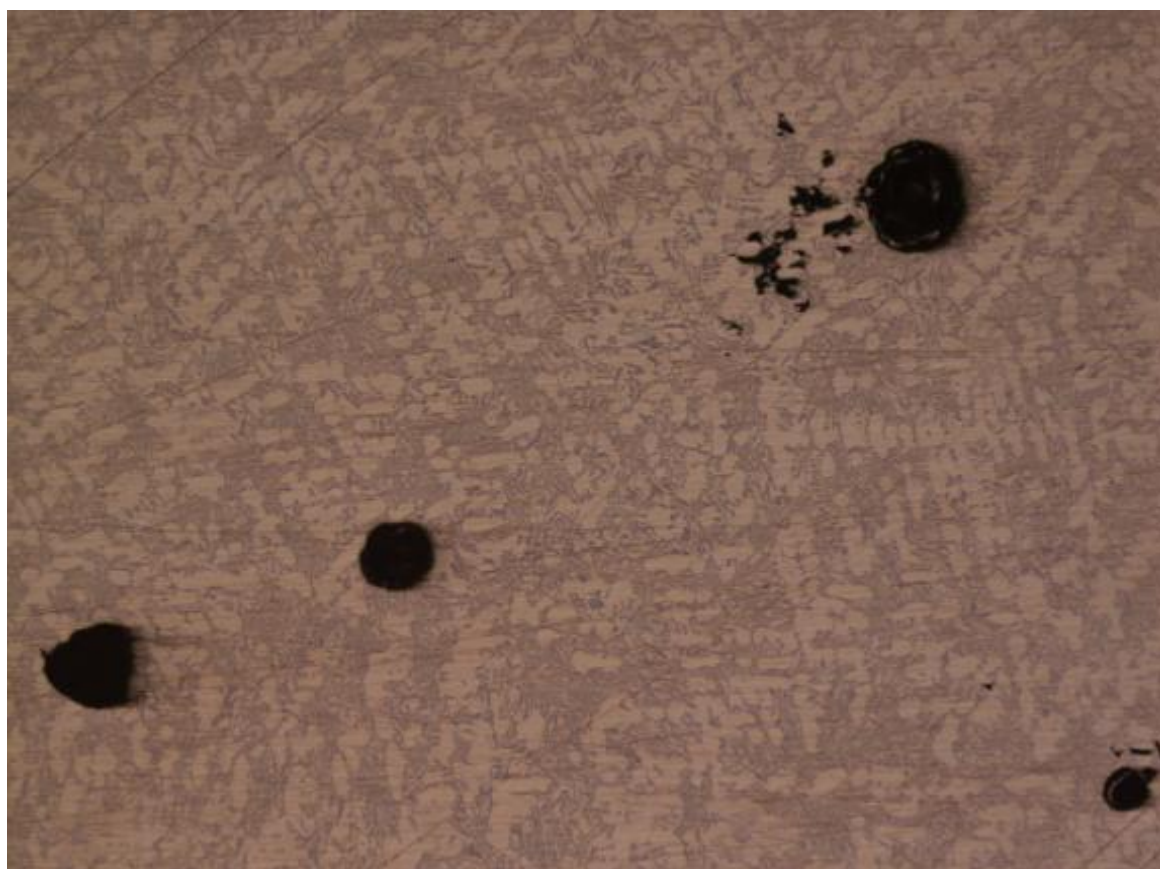
Vyhodnocená míra porézity pomocí elektronického sčítání programem NIS-Elements 2.30 byla již objektivnější a mnohem přesnější, i když šlo pouze o lokální hodnocení porézity jednotlivých vzorků. Vyhodnocená porezita u všech vzorků prokázala jejich přípustné procento pórovitosti, ovšem ve většině případů byla odečtená pórovitost vzorků téměř nulová. Přípustná procenta pórů v odlitcích jsou maximálně 2 %, takže všechny měřené vzorky ze slitiny AlSi11 obsahují přípustný počet pórů. Porezita získaná u vzorků metalografickou kvantifikací je znázorněna v *grafu 5*.

Největší procenta pórovitosti prokázali vzorky odlévané gravitačně – 1W a 3W (*viz obr. 16*). Řádově se tyto hodnoty pohybovaly okolo 0,8 – 1,25 % pórů na měřené ploše výbrusu 3x3 mm, ostatní vzorky se pohybovaly od hodnot 0,02 – 0,2 % pórů (*viz obr. 17*). Takovéto odlitky jsou zdravé bez výrazných vnitřních necelistvostí. Naměřená porezita vzorků je programem NIS-Elements 2.30 je znázorněna v *tab. 7 a 8* (*viz str. 29*).

Příklady struktur vzorků s různou pórovitostí jsou zobrazeny na *obr. 16, 17 a 18*.

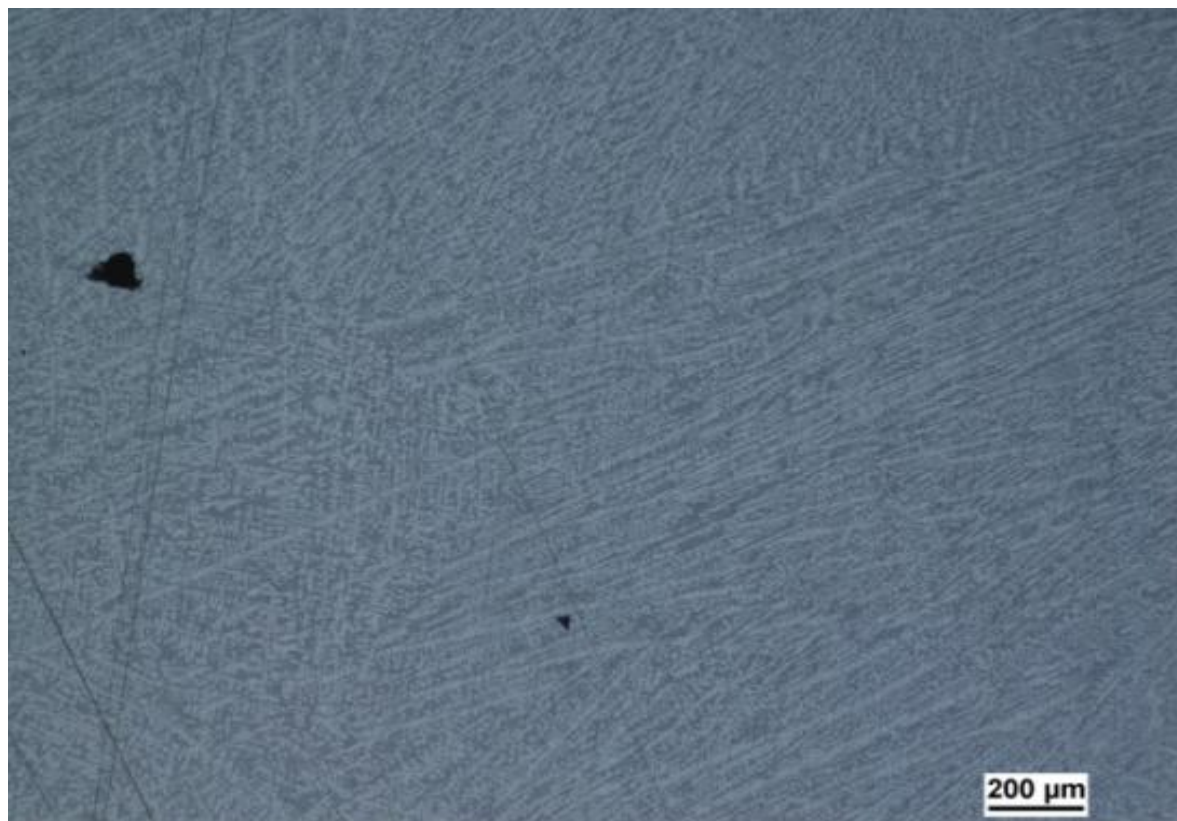


Graf 5 – Znázorněná porezita u všech vzorků



Obr. 16 – Pórovitost vzorku 1W obsahující 1,3 % pórů - zv. 50x





*Obr. 17 – Pórovitost vzorku 2W s minimálním procentem 0,2% pórů – zv. 50x*



*Obr. 18 – Pórovitost vzorku 4W téměř s nulovým procentem pórů – zv. 50x*





## 7. Závěr

Tato bakalářská práce měla za úkol diagnostikovat míru porezity normalizované hliníkové slitiny AlSi111, ze které bylo vyrobeno osm vzorků na katedře slévárenství Technické univerzity v polském městě Čenstochová. Tyto vzorky byly odlévány s tzv. řízenou porezitou – tj. aby jejich celý objem obsahoval konstantní porezitu.

Experimentálním měřením prostřednictvím nedestruktivního testování vířivých proudů se hodnotil úbytek elektrické vodivosti na vzorcích ze slitiny AlSi111 vlivem jejich minimálně rozdílným porézním objemem. Porezita byla stanovena metalografickou kvantifikací pomocí elektronického odečítání programem analýzy obrazu NIS-Elements 2.30. S pomocí naměřených hodnot získaných prostřednictvím úbytku elektrické vodivosti vzorků se stanovil matematický model ve tvaru  $x = (y/16,31)^{-25}$ , kde  $y$  představuje úbytek elektrické vodivosti a  $x$  míru pórovitosti. Tento model je použitelný pro měření s příložnou sondou s frekvencí 120 kHz na rovinných plochách.

Všechny vzorky obsahovaly ve svém objemu v průměru od 0,02 – 1,25 % pórů, kdy měření úbytku vodivosti nedávalo příliš přesné výsledky, díky minimálnímu rozdílu pórů mezi jednotlivými vzorky. Směr dalšího vývoje k více použitelným a přesnějším hodnotám úbytku vodivosti prostřednictvím vířivých proudů by měl směřovat k experimentálním měřením s více proměnnými poréznějšími vzorky s obsahem pórů nad 2 %.



## 8. Použitá literatura

- [1] Švec, M.: *Výzkum porózity kovových soustav v práškové metalurgii metodami nedestruktivního testování*. KMT – B141, bakalářská práce, TU v Liberci, 2009.
- [2] Kopec, B. a kol.: *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. Akademické nakladatelství CERM, Brno, 2008, ISBN-978-80-7204-591-4.
- [3] Michna, Lukáč, Očenášek, Kořený, Drápala, Schneider, Miškuřová a kol.: *Slitiny hliníku*. Adin, Prešov, 2005, ISBN 80-89041-88-4.
- [4] Němec M., Provazník J.: *Slévárenské slitiny neželezných kovů*. ČVUT, Praha, 2008, ISBN-978-80-01-04116-1.
- [5] Roučka, J.: *Metalurgie neželezných kovů*. Akademické nakladatelství CERM, Brno, 2004, ISBN 80-214-2790-6.
- [6] Macek K., Zuna P. a kol.: *Strojírenské materiály*. ČVUT, Praha, 2003, ISBN-80-01-02798-8.
- [7] Ptáček, L. a kol.: *Nauka o materiálu I*. Akademické nakladatelství CERM, Brno, 2003, ISBN 80-7204-238-1.
- [8] Ptáček, L. a kol.: *Nauka o materiálu II*. Akademické nakladatelství CERM, Brno, 2002, ISBN 80-7204-248-3.
- [9] Technická dokumentace měřicího přístroje SIGMATEST 2.069.